

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

M. Welter / E. Manske / G. Jäger

Beitrag zur Entwicklung nanoskaliger Kalibriersysteme

ABSTRACT

Der Beitrag gibt einen Überblick über die Entwicklung von zwei variablen, kompakten Normalen zur Kalibrierung eindimensionaler Längenmesssysteme. Die Normale wurden zur Prüfung von Rastersondenmikroskopen entwickelt, eignen sich jedoch auch zur Anwendung bei Längenmesstastern, taktilen und nicht-taktilen Nanomesstastern und weiteren Messsystemen der Nanomesstechnik. Sie bestehen aus längen- und winkelmessenden Laserinterferometern als leicht rückführbarer Referenz sowie piezoelektrischen Antriebssystemen zur gezielten Variation der Höhe der Normale. Mit einer Baugröße von $50 \times 60 \times 50 \text{ mm}^3$ bzw. $50 \times 50 \times 25 \text{ mm}^3$, einem Hub von maximal $12 \text{ }\mu\text{m}$, kombinierten Kurzzeit-Messunsicherheiten von 3.4 nm bzw. 0.8 nm und einer flexiblen Benutzeroberfläche gestatten diese Normale die Durchführung einer Vielzahl von Kalibriervorgängen statischer und dynamischer Art.

1. EINFÜHRUNG

In der Präzisionslängenmesstechnik sind zahlreiche ein- und mehrdimensionale Messsysteme bekannt, die Messunsicherheiten im Submikrometerbereich besitzen. Zu diesen Geräten zählen Rastersondenmikroskope (RSM), aber auch kapazitive und optische Sensoren, die in diesen Mikroskopen eingesetzt werden. Weitere Beispiele für solche Messsysteme sind SNOMs, konfokale und Weißlichtmikroskope sowie taktile und nicht-taktile Nanotaster verschiedener Bauarten.

Diese Messsysteme müssen rückführbar kalibriert werden, um beispielsweise im Rahmen von Qualitätssicherungsmaßnahmen als Mess- oder Prüfmittel eingesetzt werden zu können. Durch die ständig wachsende Verbreitung von RSM im Forschungs- und Produktionsumfeld kommt der Kalibrierung dieser Geräte eine besondere Bedeutung zu. Bislang ist eine Vielzahl von Prüfmitteln notwendig, um die einzelnen Messsysteme umfassend zu kalibrieren. Dynamische Eigenschaften der Messsysteme lassen sich zudem nur eingeschränkt oder gar nicht kalibrieren. Ein Ansatz zur Verbesserung der Kalibriermöglichkeiten ist die Schaffung eines neuen Kalibriersystems, mit dessen Hilfe sich unterschiedliche Merkmale verschiedener Messsysteme hochpräzise und leicht rückführbar kalibrieren lassen.

2. KONZEPT EINES KOMPAKTEN KALIBRIERSYSTEMS

Das Konzept des neuen Kalibriersystems sieht vor, statt der üblichen körperlichen Normale ein variables Höhennormal in Form einer Positioniereinheit zu verwenden.

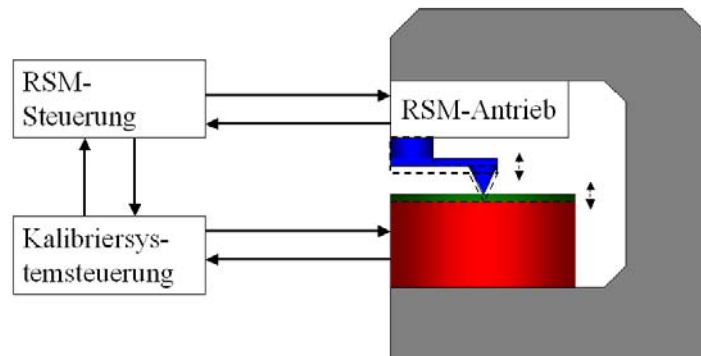


Abbildung 1: Prinzip des Kalibriersystems

Diese Positioniereinheit wird durch eine externe Einheit gesteuert, die wiederum mit der Steuereinheit des Prüflings kommuniziert. Der Prüfling tastet die Oberfläche der Positioniereinheit ab, während diese ihre Höhe ändert. Durch Vergleich der Messdaten von Prüfling und Normal werden Kalibrierinformationen gewonnen. Abb. 1 und 2 zeigen das Prinzip und die realisierten Positioniereinheiten.

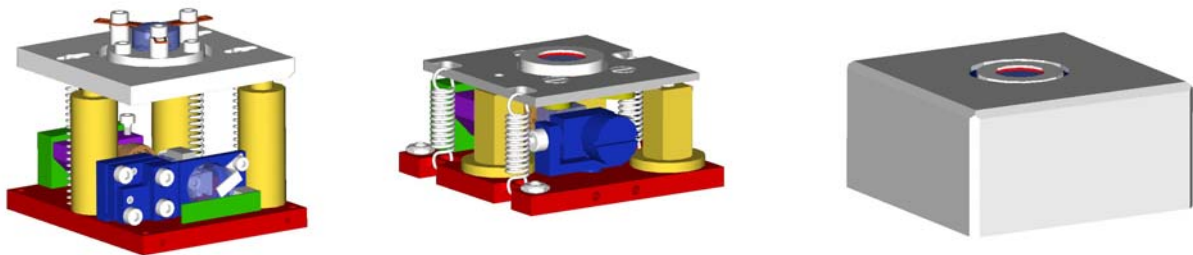


Abbildung 2: realisierte Positioniereinheiten des Kalibriersystems. Links: erste Version (50x60x50 mm³) , mittg/rechts: neue Version (50x50x25 mm³ inkl. Gehäuse)

3. KOMPONENTEN DES KALIBRIERSYSTEMS

3.1 POSITIONIEREINHEIT

Aus dem in Abbildung 1 dargestellten Prinzip und einer Marktstudie, die alle im Jahr 2000 verfügbaren, als metrologietauglich eingestuften RSM umfasste, wurden die folgenden Anforderungen an

die Positioniereinheit des Systems abgeleitet [WEL00]:

Achse	X	Y	Z
Baugröße	≤50 mm	≤50 mm	≤25 mm
Mess- und Positionierbereich	≥100 μm	≥100 μm	≥10 μm
Messauflösung absolut	≤0,1 nm	≤0,1 nm	≤0,1 nm
Positionierauflösung	≤0,01 nm	≤0,01 nm	≤0,01 nm
Messunsicherheit absolut	≤1 nm	≤1 nm	≤1 nm
Messunsicherheit relativ	≤10 ⁻⁵	≤10 ⁻⁵	≤10 ⁻⁴
Verschiebegeschwindigkeit	≥1 $\frac{mm}{s}$	≥1 $\frac{mm}{s}$	≥5 $\frac{mm}{s}$

Tabelle 1: Anforderungen an die Positioniereinheit

Aufgrund der Komplexität der Anforderungen wurden zunächst nur zwei einachsige Positioniereinheiten realisiert, vgl. Abb. 2. Als Antriebselemente dienen Piezoaktuatoren. Ihre Baugröße bestimmt die Gesamthöhe der Positioniereinheiten wesentlich. Die geringe Bauhöhe des zweiten Prototypen resultiert aus der Verwendung ungekapselter OEM-Aktuatoren, während in der ersten Variante noch gekapselte Antriebselemente verwendet wurden.

Ein weiterer, besonders wichtiger Aspekt ist die leichte Rückführbarkeit der Längenmessungen. Um diese zu realisieren, kommt als Längenmesssystem ein Laserinterferometer zum Einsatz.

3.2 LÄNGEN- UND WINKELMESSINTERFEROMETER

Die geforderte Messunsicherheit erzwingt eine hochparallele Verschiebung der Oberfläche der Positioniereinheit, da Messabweichungen erster Ordnung minimieren werden müssen. Bereits bei einer Winkelabweichung von 1 arcsec und einem Versatz der Messachsen von Prüfling und Normal von 0,1 mm kommt es zu 0,48 nm Längenmessabweichung.

Aufgrund der Bauraumbeschränkungen war es weder möglich, eine entsprechend genauen Führung einzusetzen, noch separate Längen- und Winkelmesssysteme. Im Rahmen der Arbeit wurde daher untersucht, welche Möglichkeiten ein kombiniertes Längen- und Winkelmessinterferometer zur Längen- und Winkelregelung bietet.

Ansatz war dabei der Effekt der Abhängigkeit von Interferenzstreifenabstand und –Neigung streifenzählender Interferometer von dem Winkel $\Theta_{R,x,y}$ zwischen Mess- und Referenzreflektor, der in

Abbildung 3 qualitativ dargestellt ist.

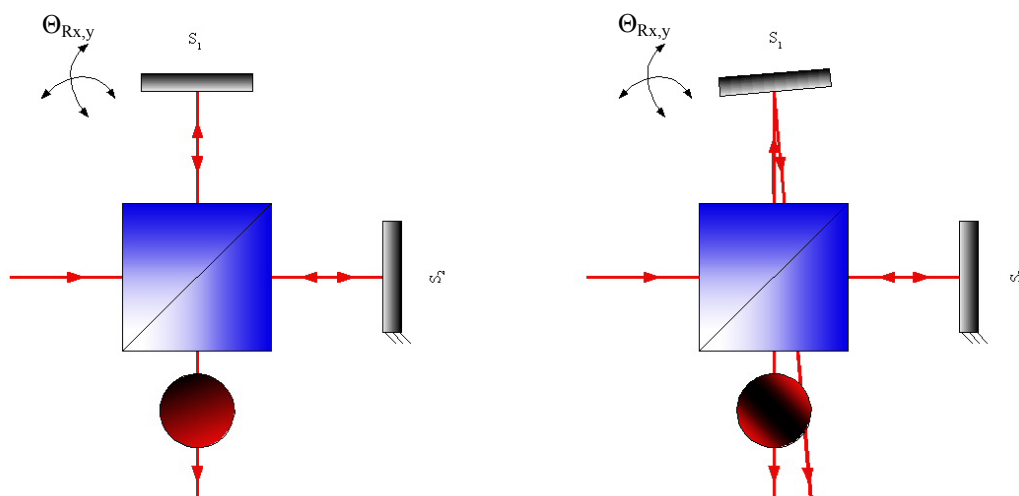


Abbildung 3: Einfluss der Reflektorverkipfung auf das Interferenzstreifenbild (qualitativ)

Die theoretische Aufarbeitung des Effektes ergab für eine typische Interferometerkonfiguration mit einer Wellenlänge $\lambda=633$ nm und einem Fotoempfängerabstand bei der Abtastung des Interferenzbildes mit Fotoempfängern in einem Abstand von $d=1,6$ mm folgende Auflösungen und Messunsicherheiten für die Winkel $\Theta_{Rx,y}$ zwischen den Reflektoren:

Auflösung $\Delta\Theta_{Rx,min} = \Delta\Theta_{Ry,min}$	$7 \cdot 10^{-3}$ arcsec
Standardmessunsicherheit $u_{\Theta_{Rx}} = u_{\Theta_{Ry}}$	$13 \cdot 10^{-3}$ arcsec
Messbereich $\Delta\Theta_{Rx,y}$	(0,7..21) arcsec

Tabelle 2: Eigenschaften des winkelmessenden Laserinterferometers

Die in den realisierten Prototypen eingesetzten Laserinterferometer sind Neuentwicklungen mit den in Tabelle 2 angegebenen messtechnischen Eigenschaften. Es erfolgte eine Verifizierung dieser Angaben mit Hilfe des ersten Prototypen der Positionierereinheit. Als Normal diente ein Autokollimationsfernrohr vom Typ Möller-Wedel Elcomat HR.

Bei den realisierten Laserinterferometern kommt der Signalauswertung eine entscheidende Rolle zu. Wesentliches Problem bei der Demodulation der Quadratursignale zur Ermittlung der Längen- und Winkelmessinformationen ist die Kenntnis der Signalparameter Amplitude, Offset und Phasenabweichung. Zur Reduzierung von Längenmessabweichungen werden die Signale in Echtzeit ermittelt und korrigiert. Die Korrektur basiert auf dem von Heydeman vorgeschlagenen Verfahren der Ellipsenkorrektur [HEY81,BIR90,CP00]. Es konnte im Rahmen der Arbeiten nachgewiesen werden, dass bei der Längenmessung mit dem hier realisierten echtzeitfähigen Verfahren residuale Nichtlinearitäten von deutlich unter 1 nm erreicht werden. Das Verfahren eignet sich in der

nearitäten von deutlich unter 1 nm erreicht werden. Das Verfahren eignet sich in der realisierten Form für die Anwendung bei zahlreichen Homodyninterferometern, die analoge Quadratursignale ausgeben.

3.3 SIGNALVERARBEITUNGSEINHEIT

Aufgrund der geforderten Flexibilität des neuen Kalibriersystems, die die Realisierung statischer und dynamischer Kalibrierregime nach Wunsch des Anwenders ermöglichen soll, kommt der Signalverarbeitung zentrale Bedeutung zu. Es wurde daher ein leistungsfähiger DSP der Serie C6711 von Texas Instruments vorgesehen.

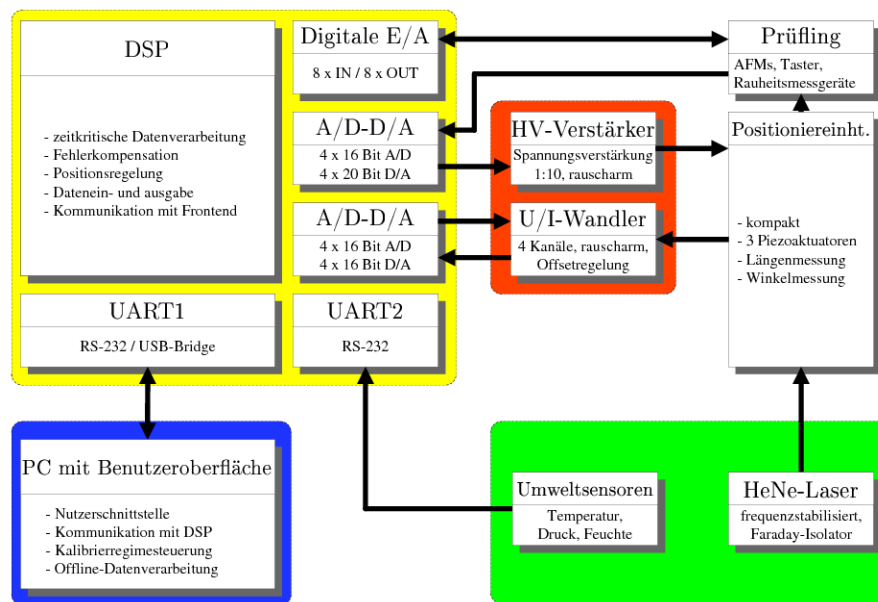


Abbildung 4: Struktur des Kalibriersystems

Durch Kombination mit hochauflösenden A/D- und D/A-Wandlerkarten, die im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden, entstand ein mehrkanaliges Echtzeit-Signalverarbeitungssystem zur Bewältigung zeitkritischer Aufgaben, wie Positionsregelung und Kalibrierdatenaufzeichnung. Zeitunkritische Aufgaben, wie Vorgaben des Kalibrierregimes und die Datenauswertung nach erfolgter Kalibrierung, werden auf einem PC über eine Benutzeroberfläche mittels Matlab durchgeführt.

3.4 WEITERE KOMPONENTEN

Weitere wesentliche Komponenten entsprechend Abbildung 4 sind HeNe-Laser, Umweltsensoren, Piezo- und Fotostromverstärker. Die Versorgung des Interferometers in der Positioniereinheit erfolgt dabei mittels Lichtwellenleiter. Der HeNe-Laser ist frequenzstabilisiert. Umweltsensoren die-

nen der Luftbrechzahlkompensation. Die Ansteuerung der Piezoelemente sowie die Verarbeitung der Fotoempfängersignale wird mittels rauscharmer Verstärker realisiert.

4. MESSUNSICHERHEIT

Die Messunsicherheit der beiden realisierten Prototypen wurde mittels einer Unsicherheitsbetrachtung nach GUM bestimmt. Es ergab sich folgendes Bild:

Beschreibung	Beitrag / alt	Beitrag / neu
Laserfrequenz	$u_1(l_z) = 0,232 \text{ nm}$	$u_1(l_z) = 0,02 \text{ nm}$
Signalmodulation	$u_2(l_z) = 0,58 \text{ nm}$	$u_2(l_z) = 0,58 \text{ nm}$
Winkelmessung	$u_3(\Theta_{x,y}) = 0,058 \text{ arcsec}$	$u_3(\Theta_{x,y}) = 0,058 \text{ arcsec}$
Signalerfassung Prüfling	(nicht abschätzbar)	(nicht abschätzbar)
Signalverarbeitung	(vernachlässigbar)	(vernachlässigbar)
Messreflektor	(vernachlässigbar)	(vernachlässigbar)
Luftbrechzahl	$u_7(l_z) = 2,171 \text{ nm}$	$u_7(l_z) = 0,188 \text{ nm}$
Thermische Ausdehnung	$u_8(\vartheta) = 51,636 \text{ nm}$ (Langzeit), $u_8(\vartheta) = 2,484 \text{ nm}$ (Kurzzeit, 20 min)	$u_8(\vartheta) = 7,356 \text{ nm}$ (Langzeit), $u_8(\vartheta) = 0,354 \text{ nm}$ (Kurzzeit, 20 min)
Winkelabweichungen	$u_9(l_z) = 0,396 \text{ nm}$	$u_9(l_z) = 0,396 \text{ nm}$
Kombinierte Unsicherheit (Langzeit)	$u_c = 51,687 \text{ nm}$	$u_c = 7.392 \text{ nm}$
Kombinierte Unsicherheit (Kurzzeit)	$u_c = 3.381 \text{ nm}$	$u_c = 0.811 \text{ nm}$

Tabelle 3: Beiträge zur Messunsicherheit (alter Prototyp mit 50x60x50 mm³ Bauraum, neuer Prototyp mit 50x50x25 mm³ Bauraum)

Die reduzierte Messunsicherheit des neuen Prototypen resultiert aus der optimierten Totstrecke und der Verwendung des Werkstoffs INVAR für kritische Komponenten. Innerhalb eines Messzeitraums von 20 min lassen sich mit diesem neuen Prototypen Kalibrierungen mit Unsicherheiten von weniger als 1 nm durchführen.

5. KALIBRIERBEISPIELE

Anhand eines Rastersondenmikroskops und eines induktiven Längenmesstasters wurden praktische Versuche zu statischen und dynamischen Kalibrierungen durchgeführt.

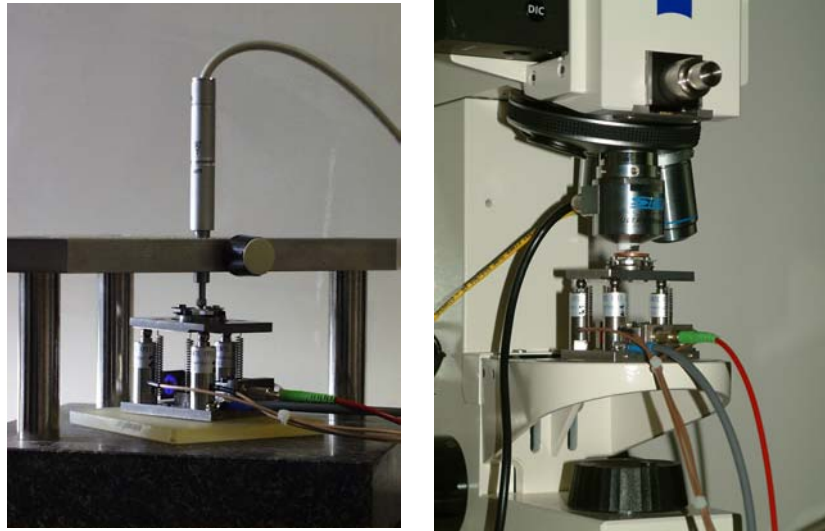


Abbildung 5: Positioniereinheit des Kalibriersystems und Prüflinge. Links: induktiver Längmesstaster, rechts: Rastersondenmikroskop

Zur statischen Kalibrierung wurde jeweils in der Z-Achse ein stufenförmiges Höhenprofil vorgeben. Es ist in Abbildung 6 zusammen mit der erwarteten abgetasteten, virtuellen Oberfläche dargestellt.

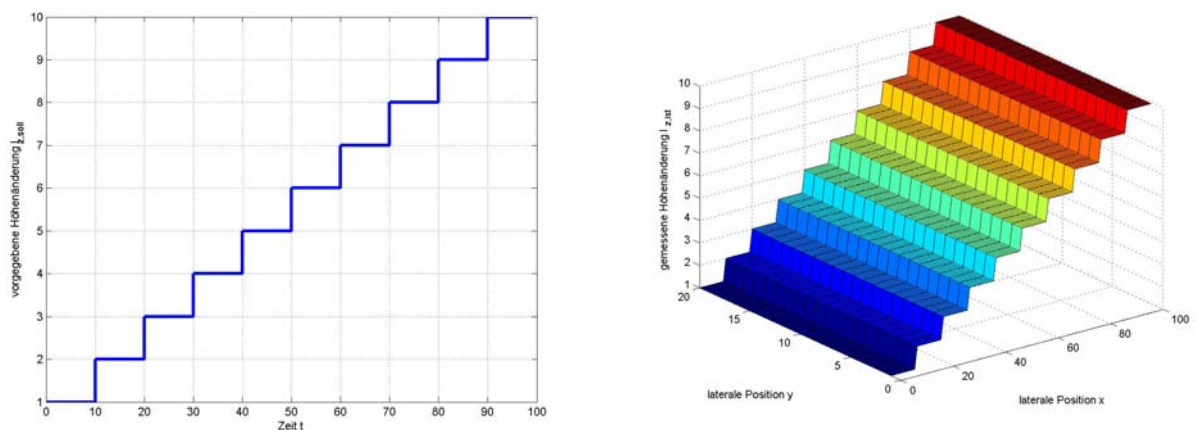


Abbildung 6: Kalibrierprinzip. Links: Vorgabe verschiedener Höhen über Zeit, rechts: mit Rastersondenmikroskop abgetastete, virtuelle Oberfläche

Abbildung 7 zeigt die mit dem Rastersondenmikroskop abgetastete Oberfläche, wobei die Höheninformation farblich kodiert ist. Man erkennt das stufenförmige Profil. Ebenso sind im Profilschnitt Kriecherscheinungen von etwa 30 nm je Stufe und die Nichtlinearität der Kennlinie des Rastersondenmikroskops wiedergegeben. Als Ergebnis der Kalibrierungen lässt sich die Kennlinie mittels eines Polynoms zweiter Ordnung angeben.

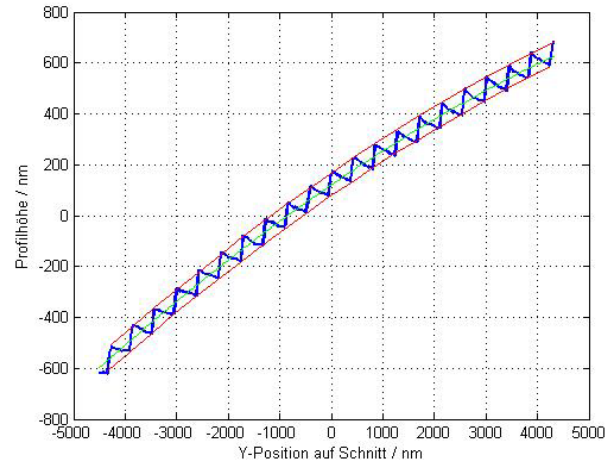
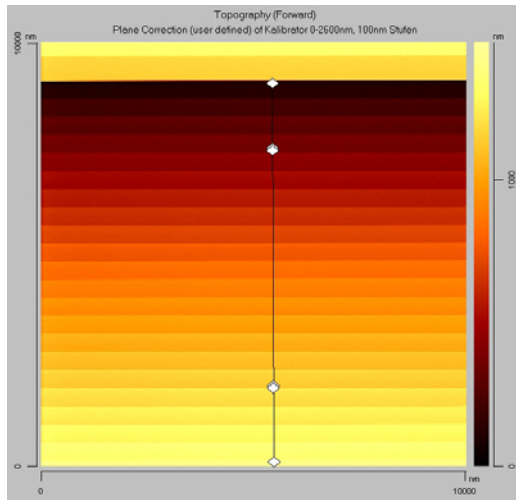


Abbildung 7: Messergebnis bei Kalibrierung des Rastersondenmikroskops. Links: Virtuelle Oberfläche in Falschfarbendarstellung, rechts: Profilschnitt

Mit dem induktiven Längenmesstaster sollten im wesentlichen dynamische Kalibriermöglichkeiten erprobt werden. Ziel war die Ermittlung der Übertragungsfunktion des Tasters. Durch Vorgabe einer sinusförmigen Höhenänderung der Positioniereinheit, zeitsynchrone Aufzeichnung der Weginformationen von Positioniereinheit und Taster mit dem Kalibriersystem und anschließende Auswertung ergaben sich die in Abbildung 8 gezeigten Frequenzgänge. Aus den Daten lässt sich die Übertragungsfunktion ableiten zu

$$G(j\omega) = \frac{0.10023 \text{ V}\mu\text{m}^{-1}}{1 + j\omega 0.0025 \text{ s}}$$

Bei einer vorausgegangenen statischen Kalibrierung ergaben sich bei Approximation der Tasterkennlinie über einen Kalibrierbereich von $\pm 1 \mu\text{m}$ mittels einer Geraden Residuen kleiner 2 nm.

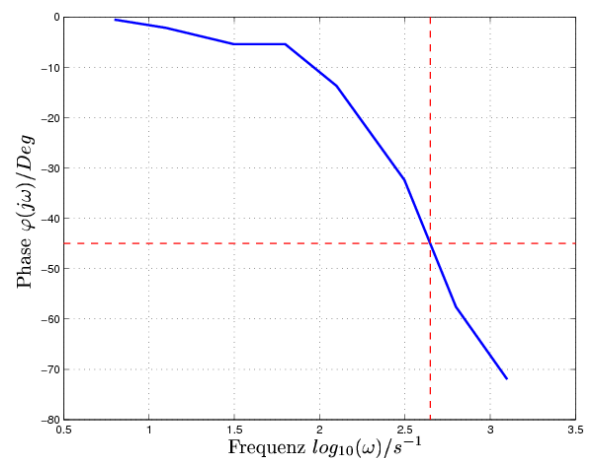
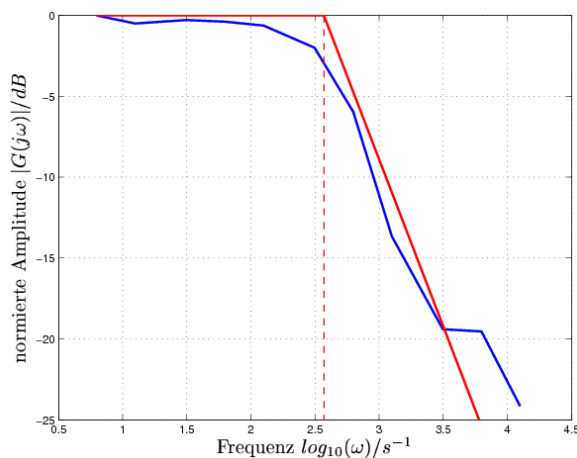


Abbildung 8: Messergebnis bei Kalibrierung des induktiven Längenmesstasters. Links: Amplitudenfrequenzgang, rechts: Phasenfrequenzgang

6. ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurde ein Überblick über ein neues nanoskaliges Kalibriersystem gegeben. Neben den Anforderungen an das Kalibriersystem wurden die wesentlichen Komponenten des Systems, wie Positioniereinheit, Längen- und Winkelmessendes Interferometer und Signalverarbeitungseinheit besprochen. Das Kalibriersystem gestattet rückführbare Kalibrierungen mit Positionieraufösungen von deutlich unter 0.1 nm bei Kurzzeit-Messunsicherheiten von 3.4 nm bzw. 0.8 nm. Es ist mit 50x50x25 mm³ kompakt genug, um in einer Vielzahl von Längenmesssystemen der Nanomesstechnik eingesetzt zu werden. Beispiele von statischen und dynamischen Kalibrierungen eines Rastersondenmikroskops und eines Längenmesstasters demonstrieren die Leistungsfähigkeit des Systems.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [BIR90] BIRCH, K.B.: Optical fringe subdivision with nanometric accuracy.
In: *Precision Engineering* 12 (1990), Nr. 4, S. 195-198
- [CP00] CÍP, O.; PETRU, F.: A scale-linearization method for precise laser interferometry.
In: *Measurement Science and Technology* 11 (2000), S. 133-141
- [HEY81] HEYDEMAN, P.: Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers.
In: *Applied Optics* 20 (1981), Nr. 19, S. 3382-3384
- [WEL00] WELTER, M.: Grundlegende Untersuchungen zu ultrapräzisen Laserkalibriersystemen
Technische Universität Ilmenau, Diplomarbeit, Juli 2000

Autorenangabe(n):

Dipl.-Ing. Matthias Welter
Robert Bosch Fahrzeugelektrik Eisenach GmbH
GS-SI/ENS-Eh
Robert-Bosch-Allee 1
99817 Eisenach
Tel.: +49 3691 64-2162
Fax: +49 3691 64-2199
E-mail: matthias.welter@de.bosch.com

Dr.-Ing. Eberhard Manske
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Jäger
TU Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Prozessmess- und Sensortechnik
98693 Ilmenau
Tel.: +49 3677 69-2822
Fax: +49 3677 69-1412
E-mail: eberhard.manske@tu-ilmenau.de
gerd.jaeger@tu-ilmenau.de